

양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상이 Self-Pulsation 주파수가 THz 대역인 다중 영역 Complex-Coupled DFB 레이저의 수율 특성에 미치는 영향

김태영 · 박재우 · 김부균[†]

승실대학교 정보통신전자공학부
Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도동 511

(2008년 4월 2일 받음, 2008년 6월 10일 수정본 받음, 2008년 6월 10일 게재 확정)

양 단면 반사율과 단면 회절격자의 위상, 위상 조정 영역의 위상이 모드 비팅에 의한 SP(self-pulsation) 주파수가 THz 대역인 다중 영역 CC(complex-coupled) DFB 레이저의 SP 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보았다. 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 다중 영역 CC DFB 레이저에서 같은 결합세기와 CR(coupling-ratio)을 가지는 경우 양 단면 반사율이 커질수록, 같은 결합 세기와 단면 반사율을 가지는 경우 CR이 작을수록, SP 주파수 변화폭이 큼을 볼 수 있다. 또한 같은 CR과 단면 반사율을 가지는 경우는 결합세기가 큰 경우가 SP 주파수 변화폭이 작음을 볼 수 있다. 결합세기가 3인 경우 같은 단면 반사율에서 CR이 커질수록(같은 CR에서 단면 반사율이 커질수록) 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 감소함을 볼 수 있다. 결합세기가 4인 경우 같은 단면 반사율에서 CR이 커질수록(같은 CR에서 단면 반사율이 커질수록) 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 증가함을 볼 수 있다.

주제어: 다중 영역 DFB 레이저, THz 대역, 단면 반사율, 위상 조정 영역 위상, Self-Pulsation, 수율

I. 서 론

주파수가 100 GHz - 10 THz 영역에 존재하는 테라헤르츠 (THz)파는 100 GHz 이하의 주파수를 가지는 밀리미터파 및 마이크로파 영역과 10 THz 이상의 주파수를 가지는 적외선 영역과 비교하면, 테라헤르츠파 생성 및 검출에 사용되는 소자 및 시스템 개발의 어려움 때문에 최근까지 테라헤르츠파 기술의 개발과 이를 이용한 응용이 늦어지고 있다.^[1] 최근에 두 개의 CC(complex-coupled) DFB 영역과 위상 조정 영역이 집적된 다중 영역 DFB 레이저를 100 GHz - 10 THz 주파수 영역에 존재하는 테라헤르츠파 대역의 신호를 발생시키는 여기 광원으로 사용할 수 있으리라는 논문이 보고되었다.^[2]

두 CC DFB 영역의 회절격자 구조가 IP(in-phase) 회절격자를 가지는 경우 장파장 모드가 발진하여 두 IC(index-coupled) DFB 영역을 가지는 다중영역 DFB 레이저에 비하여 안정된 SP(self-pulsation) 동작이 발생된다. 또한 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 CC DFB 영역의 브래그 파장 중심에 위치시키는 경우가 발진 모드의 파장 중심에 위치시키는 경우에 비하여 발생시킬 수 있는 SP 주파수가 더 큼을 알 수 있었고 변조지수 특성도 더 우수함을 볼 수 있었다.^[3]

다중 영역 DFB 레이저 제작 시에 양 단면을 무반사 코팅 하여도 잔류 반사율이 존재하게 된다. 이러한 잔류 반사율이 존재하면 양 단면의 회절격자 위상이 다중 영역 DFB 레이저의 SP 동작 특성에 영향을 미치게 된다. 현재 개발되어 있는 기술로는 DFB 레이저의 단면 격자 위상을 정확하게 조절하

기가 매우 어렵기 때문에 단면에 잔류 반사율이 존재하는 경우 양 단면 회절격자의 위상은 랜덤하게 발생된다고 가정하여야 한다. 또한 실제 다중 영역 DFB 레이저가 제작된 후 위상 조정 영역에 주입되는 전류를 변화시켜 위상 조정 영역의 위상을 변화시키므로써 다중 영역 DFB 레이저의 SP 동작 특성을 조정할 수 있다. 따라서 최근에 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 IC DFB 레이저의 SP 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴본 논문이 발표되었다.^[4] 본 논문에서는 이를 확장시켜 양 단면 반사율과 단면 회절격자의 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 SP 주파수가 THz 대역인 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴본 결과를 보고한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용한 전산 모의 방법에 대하여 간단히 살펴보고, 본 논문에서 사용한 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율에 대하여 정의한다. 3장에서는 모드 비팅에 의한 SP 주파수가 THz 대역인 다중 영역 CC DFB 레이저의 각 CC DFB 영역의 결합세기가 3과 4이고 CR이 0.1과 0.2일 때 양 단면 반사율과 회절격자 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 SP 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보았다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 전산 모의 방법 및 수율의 정의

그림 1은 양 단면 반사율과 단면 격자 위상을 고려한 두 개의 CC DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 CC DFB 레이저의 개념도를 나타낸다. 각각의 DFB 영역에

[†]E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

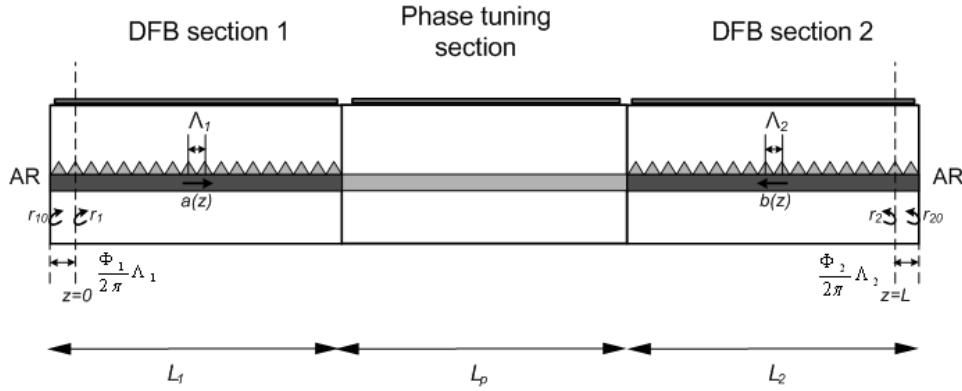


그림 1. 양 단면 반사율과 단면 격자 위상을 고려한 두 개의 CC DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성되는 다중 영역 CC DFB 레이저의 개념도.

문턱 전류 이상의 전류가 주입되면 각각의 DFB 영역에 발진 모드가 존재하고, 이러한 두 모드의 비팅에 의하여 SP 동작이 발생한다.^[5]

두 개의 모드를 방출하는 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성을 살펴보기 위하여 시간 영역 모델을 사용하였다. 시간 영역 모델은 순방향으로 진행되는 필드와 역방향으로 진행되는 필드의 상호 결합 현상을 나타내는 시간 의존 결합 모드 방정식과, 광자와 상호 작용을 하는 캐리어의 밀도 변화를 나타내는 비율 방정식을 시간 영역에서 해석하는 모델이다.^[6] 시간 영역과 공간 영역에서 결합 방정식과 비율 방정식의 수치 계산의 효율성과 정확성을 위해 연산자 분리 시 영역 모델을 사용하였다.^[7]

다중 영역 CC DFB 레이저의 양 단면에 단면 반사율이 존재하는 경우 그림 1에서 보는 것 같이 순방향으로 진행되는 정규화된 필드, $a(z,t)$,와 역방향으로 진행되는 정규화된 필드, $b(z,t)$,는 다음과 같은 경계조건을 만족해야 한다.

$$a(0,t) = r_1 b(0,t) \quad (1)$$

$$b(L,t) = r_2 a(L,t) \quad (2)$$

여기서 r_1 과 r_2 는 각각 그림 1에서 왼쪽 단면과 오른쪽 단면의 격자 위상을 포함한 단면 반사 계수를 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$r_1 = r_{10} e^{-j\phi_1} \quad (3)$$

$$r_2 = r_{20} e^{-j\phi_2} \quad (4)$$

여기서 r_{10} 와 r_{20} 는 각각 그림 1에서 왼쪽 단면과 오른쪽 단면의 단면 반사 계수를 나타낸다. ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 왼쪽 단면과 오른쪽 단면의 기준면으로부터의 격자 위상을 의미하며 이러한 격자 위상에 해당하는 길이는 그림 1에 나타난 것처럼 각각 $\frac{\phi_1}{2\pi} \Lambda_1$ 과 $\frac{\phi_2}{2\pi} \Lambda_2$ 이다.

다중 영역 CC DFB 레이저의 양 단면을 무반사 코팅하여도 잔류 반사율이 존재하게 된다. 현재 개발되어 있는 기술로는 DFB 레이저의 단면 격자 위상을 정확하게 조절하기가 매우 어렵기 때문에 단면에 잔류 반사율이 존재하는 경우 양 단면 회절격자의 위상은 랜덤하게 발생한다고 가정하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 단면 반사율과 단면 격자 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보기 위하여 수율을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\frac{\text{판단기준을 만족하는 위상 조합의 수}}{\text{전체 양 단면 회절격자의 위상 조합의 수}} \times 100(\%) \quad (5)$$

양 단면 회절격자의 위상을 각각 16등분하여 전체 256가지의 위상 조합을 만들어 각각의 위상 조합에 대하여 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상을 변화시키며 1 THz 대역에서 동작하는 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성을 전산 모의하였다. 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율을 계산하기 위하여 우리가 설정한 판단기준은 다음과 같다.

1. 출력 파형의 SP 주파수가 두 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장 차이로 주어지는 주파수와 일치하여야 한다.
2. SP 동작의 기본 주파수와 고차 주파수(spurious) 성분과의 크기 차이가 25 dB 이상이어야 한다.
3. 출력 파형의 변조 지수가 0.1 이상이어야 한다.

위의 3가지 조건을 모두 만족하는 경우에 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성이 판단기준을 만족한다고 판단하였다. 따라서 수율은 식 (5)와 같이 SP 동작 특성 중 판단기준을 만족하는 위상 조합의 수를 전체 양 단면 회절격자의 위상 조합의 수로 나눈 값으로 정의하였다.

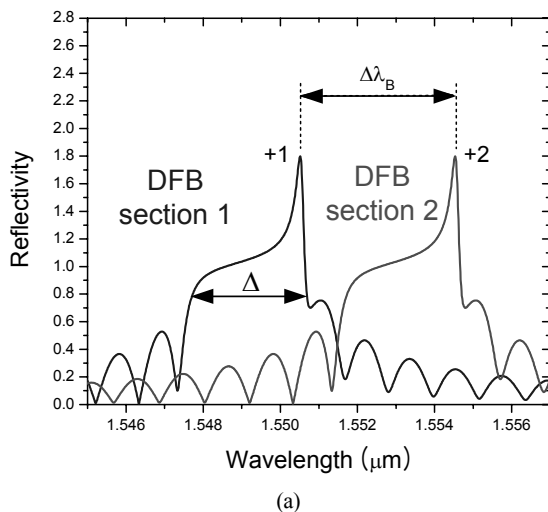
III. 양 단면 반사율과 단면 회절격자의 위상 및 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성

그림 2(a)는 $\Delta\lambda_B > \Delta$ 인 경우 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼을 보인다. DFB 영역 2의 회절격자 주기를 DFB 영역 1의 회절격자 주기보다 크도록 설정하면 DFB 영역 2의 브래그 파장이 DFB 영역 1의 브래그 파장보다 커서 각각의 DFB 영역의 반사 스펙트럼은 그림 2(a)와 같이 나타나게 된다. 여기서 Δ 는 DFB 영역의 금지 대역폭이고 $\Delta\lambda_B$ 는 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이로 $\Delta\lambda_B = \lambda_{B2} - \lambda_{B1}$ 이다. IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 발진 모드는 각각 장파장 모드인 +1 모드와 +2 모드가 발진한다.

그림 2(b)는 이득 스펙트럼과 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼을 나타낸다. 이득 분산은 3 dB 대역폭이 5 THz인 Lorentzian 함수로 근사하였다. 두 DFB 영역의 발진 모드가 받는 이득의 크기를 비슷하게 하기 위하여 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 위치시켰다. 따라서 두 DFB 영역의 발진 모드는 비슷한 크기의 이득을 받아 발진하는 두 모드의 파워가 비슷하여 양 단면에서 출력 파워의 변조지수가 크고 발생 가능한 최대 SP 주파수도 커질 것으로 생각되어진다.

CC DFB 영역은 IP 회절격자를 가지므로 각각의 DFB 영역에서는 장파장 모드인 +1 모드와 +2 모드가 발진한다. 따라서 +1 모드와 +2 모드의 비팅에 의한 SP 주파수는 식 (6)과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_B \quad (6)$$



여기서 λ_0 는 기준 파장으로 1.55 μm 이고 c 는 빛의 속도이다. 따라서 두 DFB 영역의 회절격자 주기를 조정하여 브래그 파장 차이 $\Delta\lambda_B$ 를 증가시키면 높은 SP 주파수를 가지는 SP 동작을 발생시킬 수 있다.

각 CC DFB 영역과 위상 조정 영역의 길이는 각각 300 μm 로 동일하게 설정하여 다중 영역 CC DFB 레이저 구조의 전체 길이는 900 μm 이다. 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이, $\Delta\lambda_B$,는 발진하는 두 장파장 모드의 비팅에 의한 SP 주파수가 목표로 하는 1 THz 대역 근처에서 동작을 하는 구간의 중심 값으로 결정하였다. 이 경우 $\Delta\lambda_B > \Delta$ 이므로 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 그림 2(a)와 같이 서로 중첩되지 않아 +1 모드와 +2 모드는 다른 DFB 영역으로 진행이 많이 발생하여 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수가 크게 된다.

전산 모의에 사용한 다중 영역 CC DFB 레이저의 단면 반사율은 양 단면이 동일하고 0.1%, 0.5%, 1%, 2%,와 5%로 설정하였다. 또한 각 CC DFB 영역의 결합세기는 $|\kappa L| = \sqrt{\kappa_i^2 + \kappa_g^2} L$ 이고 여기서 L은 CC DFB 영역의 길이로 300 μm 이고 결합상수 κ 는 인덱스 결합 상수(κ_i)와 이득 결합 상수(κ_g)의 합으로 $\kappa = \kappa_i + j\kappa_g$ 이다. 각 CC DFB 영역의 결합세기가 각각 3과 4일 때 CR(coupling ratio), κ_g/κ_i ,이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 전산 모의를 수행하였다. 결합세기가 2인 경우는 SP 동작이 1 THz 대역에서 거의 발생하지 않아 제외시켰다. 전산 모의를 위하여 사용한 CC DFB 영역의 주입전류는 여러 가지 결합세기와 CR의 경우에 대하여, 양 단면이 완전 무반사 코팅되어 있는 단일 CC DFB 영역에서 계산된 문턱전류 값보다 40 mA 큰 전류이다. 전산 모의에 사용된 각각의 DFB 영역에 주입된 전류 값과 1 THz 대역에서 SP 동작을 하기 위하여 필요한 $\Delta\lambda_B$ 를 표 1에 보이고, 나머지 구조 및 물질 파라미터 값은 표 2에 보인다.

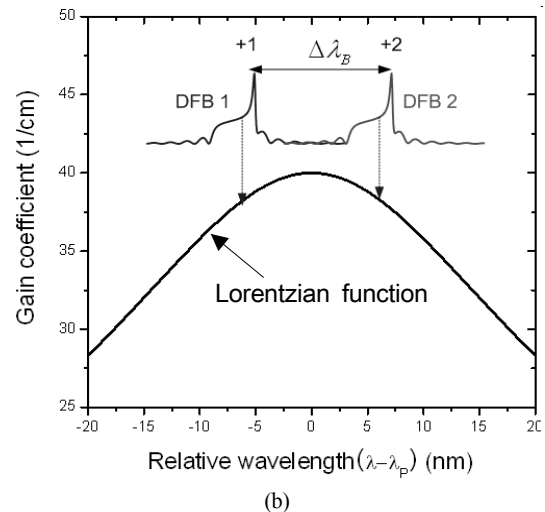


그림 2. (a) $\Delta\lambda_B > \Delta$ 인 경우 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼, (b) 이득 스펙트럼과 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼.

표 1. SP 주파수가 1 THz 대역인 여러 가지 결합세기와 CR을 가지는 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율 특성 전산 모의에 사용된 주입 전류와 $\Delta\lambda_B$.

AR-AR	$ \kappa L = 3$				$ \kappa L = 4$			
	CR = 0.1		CR = 0.2		CR = 0.1		CR = 0.2	
	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$
AR (0.1%)	74 mA	9.3 nm	76 mA	9.2 nm	69 mA	9.3 nm	71 mA	9.2 nm
AR (0.5%)								
AR (1%)								
AR (2%)								
AR (5%)								

표 2. 계산에 사용된 파라미터.

파라미터	값	단위	의미
d	0.2	μm	활성층 영역의 두께
w	2	μm	활성층 영역의 폭
n_e	3.32		유효 굴절율
n_g	3.7		군 굴절율
A	1	10^8 s^{-1}	선형 재결합 계수
B	1	$10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	자발 재결합 계수
C	0.75	$10^{-40} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	오제(Auger) 캐리어 재결합 계수
a_H	4		선폭 증가 계수
N_0	1.5	10^{24} m^{-3}	투명 캐리어 밀도
Γ	0.3		도파로 구속 계수
a_0	20×10^2	m^{-1}	손실
g_N	2.5	10^{-20} m^{-2}	미분 이득
ε	4	10^{-23} m^3	비선형 이득 억제 계수

양 단면이 완전 무반사 코팅 되어있는 경우 여러 가지 결합 세기에 대하여 위상 조정 영역의 위상을 0에서 2π 까지 0.1π 간격으로 변화시키며 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성을 살펴보았다. 그림 3은 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 위상 조정 영역의 위상에 따른 SP 주파수를 보인다. SP 주파수는 $|\kappa L| = 3$ 이고 CR이 0.1(0.2)인 경우는 1.009 THz (1.003 THz)에서 1.035 THz(1.019 THz)까지 변화하였다. $|\kappa L| = 4$ 이고 CR이 0.1(0.2)인 경우는 0.994 THz(1.015 THz)에서 1.010 THz(1.017 THz)까지 변화하였다. 결합세기와 CR이 커질수록 두 DFB 영역의 발진 모드가 위상 조정 영역의 위상 변화의 영향을 덜 받아서 SP 주파수의 변화폭이 작은 것을 알 수 있었다.

결합세기가 3인 경우, CR이 0.1인 경우가 0.2인 경우보다 판단기준을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위가 크고 SP 주파수 범위도 큼을 볼 수 있다. 그 이유는 CR이 0.1인 경우가 0.2인 경우 보다 SHB(spatial hole burning) 효과가 커 발진 모드가 다른 DFB 영역에서 반사되어 들어오는 필드의 영향을 많이 받아 각 DFB 영역의 발진 모드가 받는 이득의 크

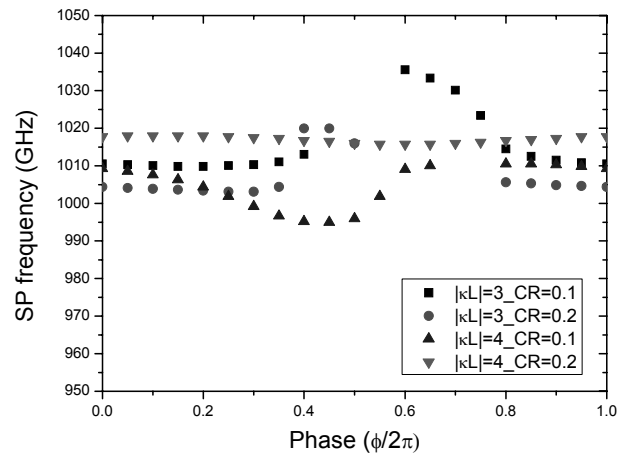


그림 3. 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 위상 조정 영역의 위상에 따른 SP 주파수.

기가 증가하기 때문이라 생각된다.

결합세기가 4인 경우, CR이 0.2인 경우가 0.1인 경우 보다 판단기준을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위는 크지만 SP 주파수 범위는 작은 것을 볼 수 있다. 그 이유는 결합세기가 4인 경우가 3인 경우에 비해 각 DFB 영역의 발진 모드의 크기가 충분히 커서 다른 DFB 영역에서 반사되어 들어오는 필드가 발진 모드의 크기에 미치는 영향이 작고, CR이 0.2인 경우가 0.1인 경우보다 SHB 효과가 작아 반사되어 들어오는 필드가 발진 모드에 미치는 영향이 작기 때문이라 생각된다.

그림 4(a)는 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 $|\kappa L|$ 이 3이고 CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장을 나타낸다. 위상 조정 영역의 위상이 0.9π 에서 1.1π 인 구간에서 판단기준을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 위상 조정 영역의 위상이 π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워를 나타낸다. 그림 4(c)는 발진 파장 스펙트럼으로 각 DFB 영역의 발진 모드가 단일 모드로 안정되지 않고 주 모드 근처에 약 0.05 nm 간격으로 모드들이 발생함을 볼 수 있다. 따라서 1 THz 대역의

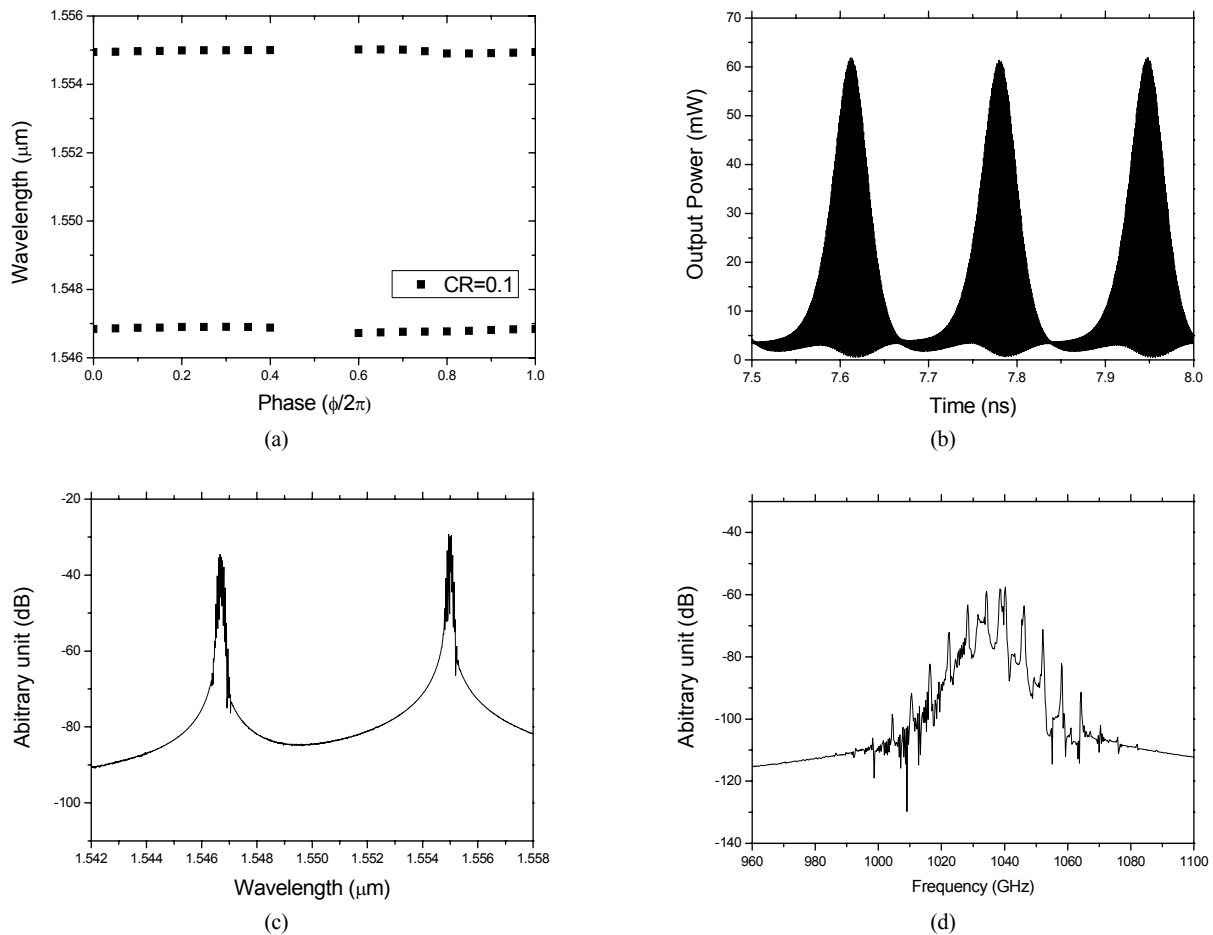


그림 4. 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 (a) $|kL|$ 이 3이고 CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장, (b) 위상 조정 영역의 위상이 π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워, (c) 발진 파장 스펙트럼, (d) SP 주파수 스펙트럼.

SP 주파수가 그림 4(b)에서 보는 것처럼 약 6 GHz로 변조되는 것을 볼 수 있다. 그림 4(d)는 SP 주파수 스펙트럼으로 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분과의 차이가 약 2 dB여서 판단기준을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다.

그림 5(a)는 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 $|kL|$ 이 3이고 CR이 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장을 나타낸다. 위상 조정 영역의 위상이 1.1π 에서 1.5π 인 구간에서 판단기준을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)는 위상 조정 영역의 위상이 1.2π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워를 나타낸다. 그림 5(c)는 발진 파장 스펙트럼으로 각 DFB 영역의 발진 모드가 단일 모드로 안정되지 않고 주 모드와 약 0.05 nm 떨어진 곳에 주 모드보다 약 20 dB 작은 모드가 발생하였다. 따라서 1 THz 대역의 SP 주파수가 그림 5(b)에서 보는 것처럼 약 6 GHz로 변조되는 것을 볼 수 있다. 그림 5(d)는 SP 주파수 스펙트럼으로 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분과의 차이가 약 10 dB여서 판단기준을

만족하지 못하는 것을 볼 수 있다.

그림 6(a)는 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 $|kL|$ 이 4이고 CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장을 나타낸다. 위상 조정 영역의 위상이 1.3π 에서 1.6π 인 구간에서 판단기준을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 위상 조정 영역의 위상이 1.4π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워를 나타낸다. 그림 6(c)는 발진 파장 스펙트럼으로 각 DFB 영역의 발진 모드가 단일 모드로 안정되어 있음을 볼 수 있다. 따라서 SP 주파수가 그림 6(b)에서 보는 것처럼 1 THz 대역에서 안정된 것을 볼 수 있다. 그림 6(d)는 SP 주파수 스펙트럼으로 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분과의 차이가 22 dB이어서 판단기준을 만족하지 못하였다.

그림 7(a)는 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 $|kL|$ 이 4이고 CR이 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장을 나타낸다. 위상 조정 영역의 모든 위상에서 판단기준을 만족하였다. 그림 7(b)는 위상 조정 영역의 위상이 1.4π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력

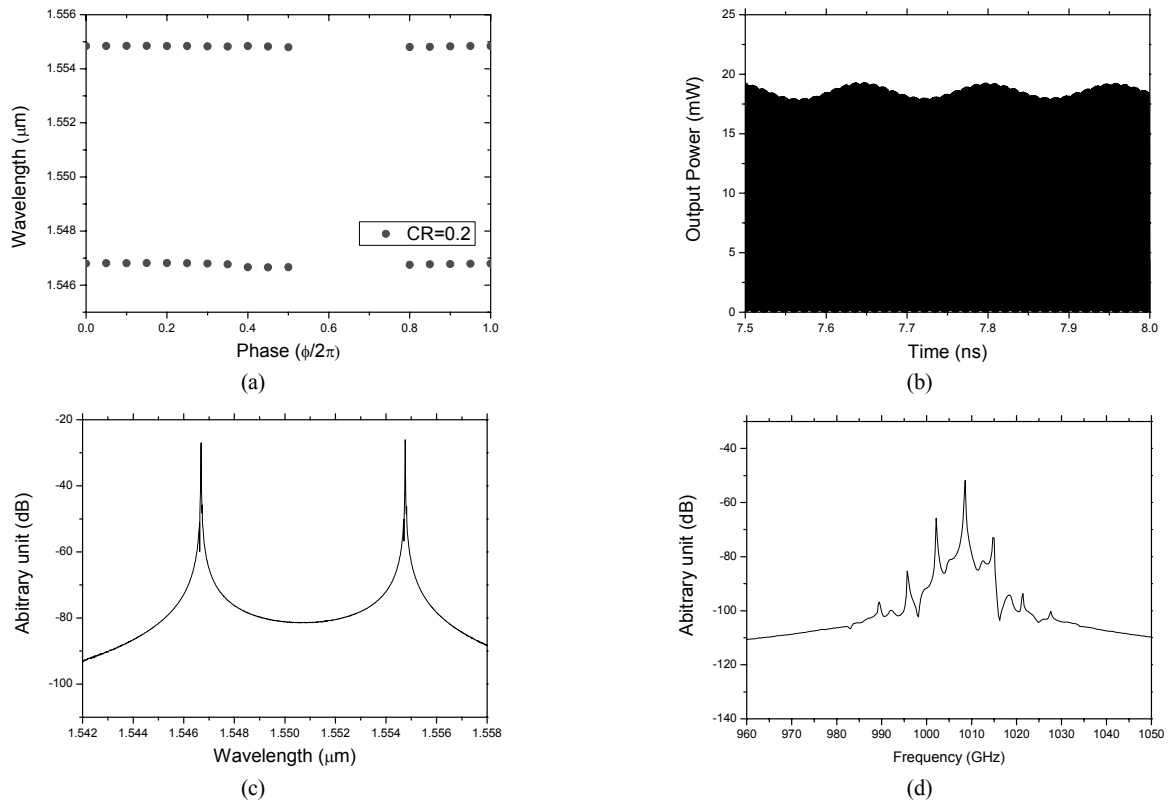


그림 5. 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 (a) $|kL|$ 이 3이고 CR이 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장, (b) 위상 조정 영역의 위상이 1.2π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워, (c) 발진 파장 스펙트럼, (d) SP 주파수 스펙트럼.

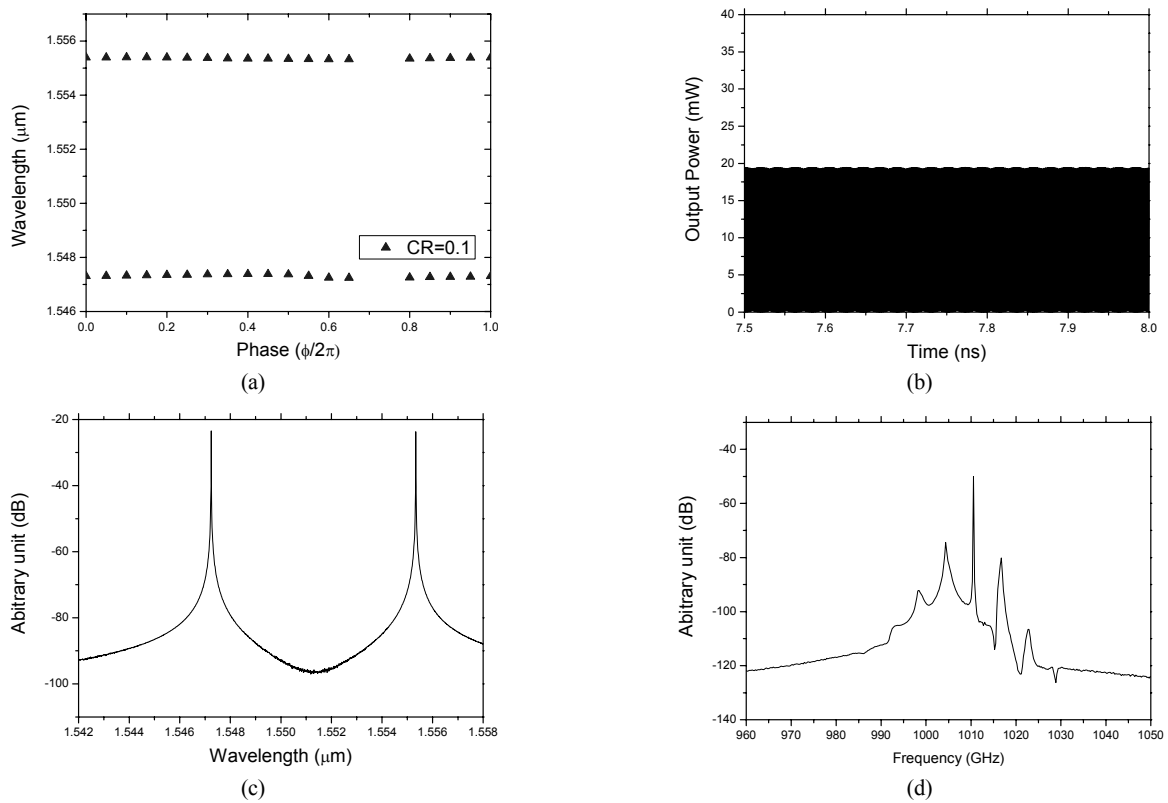


그림 6. 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 (a) $|kL|$ 이 4이고 CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장, (b) 위상 조정 영역의 위상이 1.4π 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워, (c) 발진 파장 스펙트럼, (d) SP 주파수 스펙트럼.

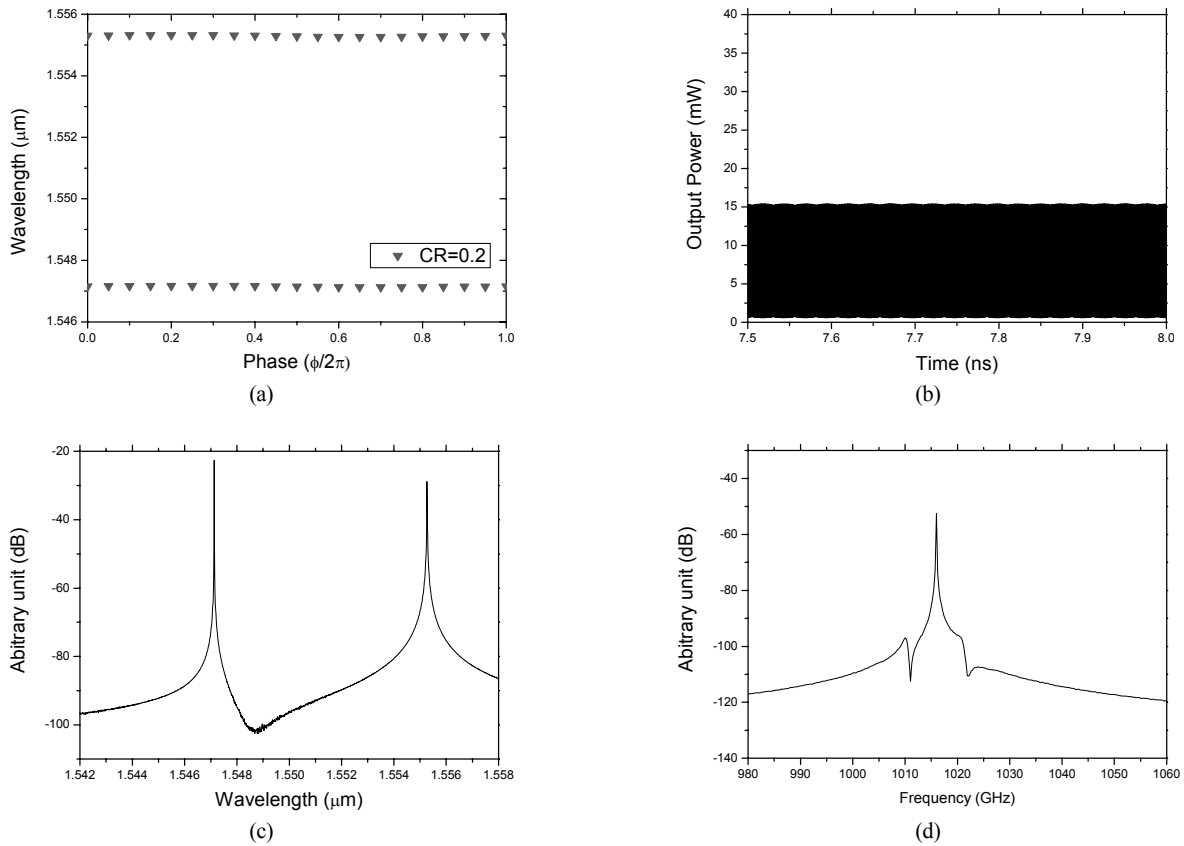


그림 7. 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 (a) $|κL|$ 이 4이고 CR이 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장, (b) 위상 조정 영역의 위상이 $1.4π$ 일 때 왼쪽 단면의 시간에 따른 출력 파워, (c) 발진 파장 스펙트럼, (d) SP 주파수 스펙트럼.

표 3. 여러 가지 결합세기와 CR에서 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성이 판단기준을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위.

$ κL = 3$		$ κL = 4$	
CR = 0.1	CR = 0.2	CR = 0.1	CR = 0.2
85%	75%	90%	100%

파워를 나타낸다. 그림 7(c)는 발진 파장 스펙트럼으로 각 DFB 영역의 발진 모드가 단일 모드로 매우 안정되어 있음을 볼 수 있다. 따라서 SP 주파수가 그림 7(b)에서 보는 것처럼 1 THz 대역에서 안정된 것을 볼 수 있다. 그림 7(d)는 SP 주파수 스펙트럼으로 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분과의 차이가 약 44 dB로 판단기준을 만족하였다.

$|κL|$ 이 4일 때 CR이 0.1인 경우와 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상이 $1.4π$ 일 때 시간에 따른 출력 파워를 비교하면 출력 변조지수는 거의 1로 비슷하나 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분과의 차이가 달라 수율도 차이가 나는 것을 볼 수 있었다.

표 3에 여러 가지 결합세기와 CR에서 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성이 판단기준을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위를 나타내

었다.

그림 8은 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상에 따른 SP 주파수를 보인다. 그림 8(a)는 $|κL|$ 이 3이고 CR이 0.1인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%,와 1%인 경우 위상 조정 영역의 모든 위상에서 SP 동작을 하였으며, 양 단면 반사율이 2%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 $0.1π$ 에서 판단기준을 만족하지 못하였다. 양 단면 반사율이 5%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 $1.9π$ 에서 $2π$ 인 구간에서 판단기준을 만족하지 못하였다. 양 단면 반사율이 증가 할수록 외부에서 반사되어 DFB 영역에 들어오는 필드의 세기가 증가하여 발진 모드의 특성 변화가 커져 위상 조정 영역의 위상에 따른 SP 주파수 변화폭이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 8(b)는 $|κL|$ 이 3이고 CR이 0.2인 경우로 양 단면 반사율이 1%, 2%,와 5%인 경우 위상 조정 영역의 모든 위상에서 SP 동작을 하였다. 양 단면 반사율이 0.1%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 $0.8π$ 에서 $1.4π$ 구간에서 판단기준을 만족하지 못하였고 양 단면 반사율이 0.5%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 $0.8π$ 에서 $1π$ 구간에서 판단기준을 만족하지 못하였다. 양 단면 반사율이 증가 할수록 판단기준을 만족하지 못하는 위상 조정 영역의 위상 범위가 작아지는 이유는 외부

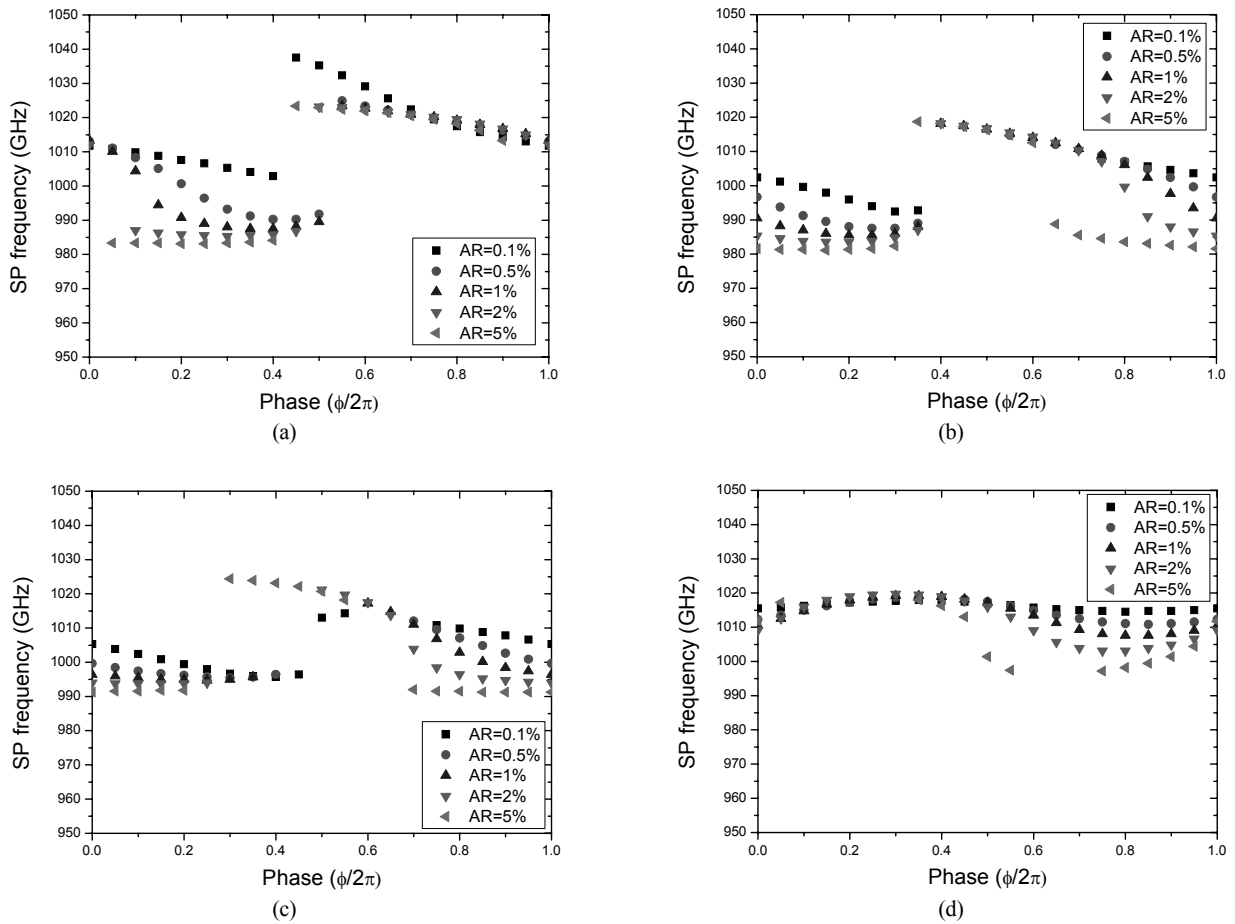


그림 8. 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상에 따른 SP 주파수. (a) $|\kappa L|$ 이 3이고 CR이 0.1인 경우, (b) $|\kappa L|$ 이 3이고 CR이 0.2인 경우, (c) $|\kappa L|$ 이 4이고 CR이 0.1인 경우, (d) $|\kappa L|$ 이 4이고 CR이 0.2인 경우.

에서 반사되어 들어오는 필드의 크기가 커져 상대적으로 발진 모드가 이득을 더 많이 받아 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분의 차이가 증가하기 때문이라 생각되어진다. CR이 0.1인 경우와 비교하면 SHB 효과가 작아 위상 조정 영역의 위상에 따른 SP 주파수 변화폭이 작은 것을 볼 수 있다.

그림 8(c)는 $|\kappa L|$ 이 4이고 CR이 0.1인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%인 경우 1.2π 에서 1.4π 인 구간에서, 양 단면 반사율이 0.5%인 경우 0.9π 에서 1.3π 인 구간에서, 양 단면 반사율이 1%인 경우 0.8π 에서 1.1π 인 구간에서, 양 단면 반사율이 2%인 경우 0.6π 에서 0.9π 인 구간에서, 그리고 양 단면 반사율이 5%인 경우 0.5π 와 1.2π 에서 1.3π 인 구간에서 판단기준을 만족하지 못하였다.

그림 8(d)는 $|\kappa L|$ 이 4이고 CR이 0.2인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%,와 2%인 경우 위상 조정 영역의 모든 위상에서 SP 동작을 하였으며 양 단면 반사율이 5%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 0.2π 에서 0.6π 구간과 1.2π 에서 1.4π 구간에서 판단기준을 만족하지 못하였다. 결합세기와 CR이 다른 세 경우보다 크기 때문에 DFB 영역의 발진 모드 특성

이 안정되어 양 단면 반사율이 5%인 경우에만 판단기준을 만족하지 못하는 위상 조정 영역의 위상이 발생하였다.

양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 양 단면 반사율에 따른 SP 주파수의 변화폭을 표 4에 나타낸다. 표 4에서 보면 같은 결합세기와 CR에서 양 단면 반사율이 커질수록 SP 주파수 변화폭이 크음을 볼 수 있다. 그 이유는 단면 반사율이 커질수록 외부에서 반사되어 들어오는 필드의 크기가 커져 발진 모드 특성에 미치는 영향이 커지기 때문이라 생각된다. 같은 결합 세기와 단면 반사율에서 CR이 커질수록 SP 주파수 변화폭이 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 CR이 커질수록 SHB 효과가 작아져 반사되어 들어오는 필드가 발진 모드 특성에 미치는 영향이 작아지기 때문이라 생각된다. 같은 CR과 단면 반사율을 가지는 경우는 결합세기가 큰 경우가 SP 주파수 변화폭이 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 결합세기가 큰 경우가 발진 모드의 크기가 커져 반사되어 들어오는 필드의 영향을 적게 받기 때문이라 생각된다.

그림 9는 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상

표 4. 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 양 단면 반사율에 따른 SP 주파수의 변화폭.

결합세기		SP 주파수 변화폭(Δf) (GHz)				
		0.1%	0.5%	1%	2%	5%
$ kL =3$	단면 반사율 CR = 0.1	34.64	34.64	35.88	37.86	40.33
	CR = 0.2	15.34	27.22	32.66	34.64	37.61
$ kL =4$	CR = 0.1	18.56	16.58	22.52	27.47	32.91
	CR = 0.2	3.46	7.92	11.63	16.58	20.78

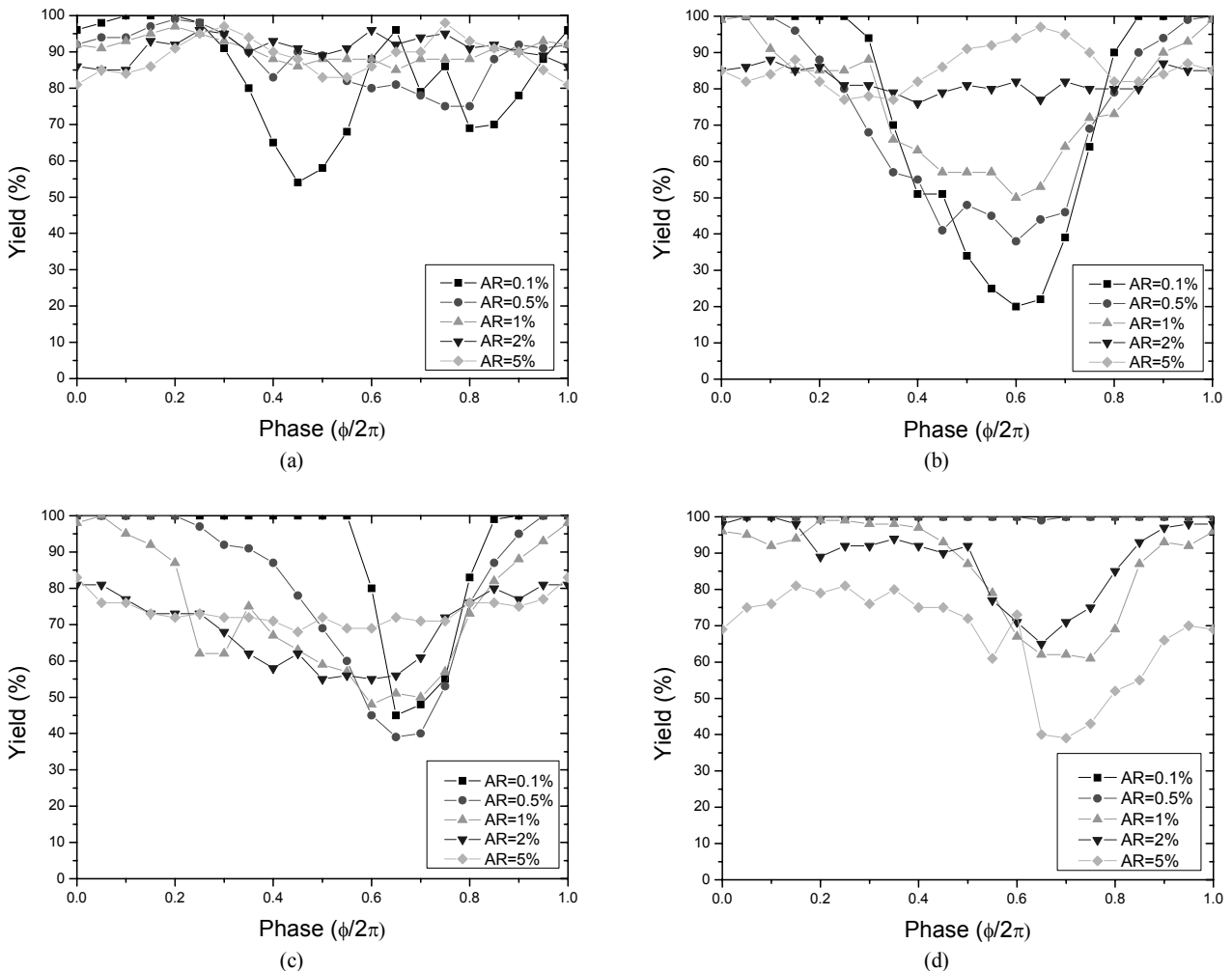


그림 9. 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상에 따른 수율. (a) $|kL|$ 이 3이고 CR이 0.1인 경우, (b) $|kL|$ 이 3이고 CR이 0.2인 경우, (c) $|kL|$ 이 4이고 CR이 0.1인 경우, (d) $|kL|$ 이 4이고 CR이 0.2인 경우.

에 따른 수율을 보여준다. 그림 9(a)는 $|kL|$ 이 3이고 CR이 0.1인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%,와 5%인 경우 최대 수율은 각각 100%, 99%, 97%, 96%,와 98%로 거의 비슷함을 볼 수 있다. 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 60%, 85%, 100%, 100%,와 100%임을 볼 수 있었다. 양 단면 반사율이 0.1%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 0.8π 인 구간에서 수율이 낮음을 볼 수 있다. 그 이유는 양 단면 무반사 코팅을 한 경우인 그림 4(a)에

서 보면 이 구간에서 SP 동작 판단기준을 만족하지 못한다. 따라서 이 구간에서 양 단면 반사율이 0.1%인 경우 양 단면 격자 위상 변화에 대하여 판단기준을 만족하지 못하는 경우가 많이 발생하여 수율이 작아지기 때문이라 생각된다. 양 단면 반사율이 증가할수록 수율이 80%이상 되는 구간의 위상 범위가 증가하는 이유는 발진 모드가 양 단면에서 반사되어 들어오는 필드로부터 받는 이득이 증가하여 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분의 차이가 증

표 5. 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 각각의 양 단면 반사율에서 발생하는 다중 영역 CC DFB 레이저의 최대 수율과 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위.

단면 반사율 결합세기		최대 수율(%)					수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위(%)				
		0.1%	0.5%	1%	2%	5%	0.1%	0.5%	1%	2%	5%
κL = 3	CR = 0.1	100	99	97	96	98	60	85	100	100	100
	CR = 0.2	100	100	100	88	97	55	45	50	80	85
κL = 4	CR = 0.1	100	100	100	81	83	85	60	40	20	5
	CR = 0.2	100	100	98	100	81	100	100	70	75	15

가하기 때문이라 생각되어진다.

그림 9(b)는 |κL|이 3이고 CR이 0.2인 경우로 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%,와 5%인 경우 최대 수율이 각각 100%, 100%, 100%, 88%,와 97%이며 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 55%, 45%, 50%, 80%,와 85%임을 볼 수 있다. CR이 0.1인 경우보다 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 줄어든 이유는 SHB 효과가 작기 때문에 발진 모드가 반사되어 들어오는 필드로부터 받는 이득이 작아 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분의 차이가 작기 때문이라 생각되어진다.

그림 9(c)는 |κL|이 4이고 CR이 0.1인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%,와 5%인 경우 최대 수율은 각각 100%, 100%, 100%, 81%,와 83%이고 양 단면 반사율이 커질수록 100%의 수율을 나타내는 위상 조정 영역의 위상 범위가 작아짐을 볼 수 있다. 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 85%, 60%, 40%, 20%,와 5%임을 볼 수 있다. 단면 반사율이 증가할수록 반사되어 들어오는 필드의 세기가 커져 각 DBF 영역의 발진 모드의 특성에 주는 영향이 커져 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 감소하는 것으로 생각된다.

그림 9(d)는 |κL|이 4이고 CR이 0.2인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%,와 5%인 경우 최대 수율은 각각 100%, 100%, 98%, 100%,와 81%이고 양 단면 반사율이 커질수록 100%의 수율을 나타내는 위상 조정 영역의 위상 범위가 작아짐을 볼 수 있었다. 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 100%, 100%, 70%, 75%,와 15%임을 볼 수 있었다. CR이 0.1인 경우보다 SHB 효과가 작아 수율이 향상됨을 볼 수 있다.

여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 각각의 양 단면 반사율에서 발생하는 다중 영역 CC DFB 레이저의 최대 수율과 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위를 표 5에 나타낸다.

IV. 결 론

본 논문에서는 모드 비팅에 의한 SP 주파수가 THz 대역인 다중 영역 CC DFB 레이저의 각 CC DFB 영역의 결합세기

가 3과 4이고 CR이 0.1과 0.2일 때 양 단면 반사율과 회절격자 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 SP 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보았다. 모드 비팅에 의한 SP 주파수가 THz 대역인 동작 특성을 만족하지 못하는 많은 경우는 각 DFB 영역에서 발진하는 주 모드 근처에 모드들이 발생하여 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분과의 차이가 25 dB 이하이기 때문이다.

양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 다중 영역 CC DFB 레이저에서 같은 결합세기와 CR을 가지는 경우 양 단면 반사율이 커질수록 SP 주파수 변화폭이 큼을 볼 수 있고 같은 결합 세기와 단면 반사율을 가지는 경우 CR이 커질수록 SP 주파수 변화폭이 작음을 볼 수 있다. 또한 같은 CR과 단면 반사율을 가지는 경우는 결합세기가 큰 경우가 SP 주파수 변화폭이 작음을 볼 수 있다.

결합세기가 3이고 CR이 0.1인 경우 양 단면 반사율이 증가할수록 수율이 80% 이상 되는 구간의 위상 범위가 증가하는 이유는 발진 모드의 크기가 작아 발진 모드가 양 단면에서 반사되어 들어오는 필드로부터 받는 이득이 증가하여 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분의 차이가 증가하기 때문이라 생각된다. CR이 0.2인 경우가 0.1인 경우보다 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 줄어든 이유는 SHB 효과가 작기 때문에 발진 모드가 반사되어 들어오는 필드로부터 받는 이득이 작아 SP에 의해 발생하는 기본 주파수 성분과 고차 주파수 성분의 차이가 작기 때문이라 생각된다.

결합세기가 4인 경우 3인 경우보다 각 DFB 영역의 발진 모드의 크기가 충분히 커서 외부에서 반사되어 들어오는 필드가 발진 모드의 크기에 미치는 영향이 작다. 따라서 양 단면 반사율이 커질수록 반사되어 들어오는 필드의 세기가 커져 각 DFB 영역의 발진 모드의 특성에 미치는 영향이 커져 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 감소함을 볼 수 있었다. 또한 CR이 0.2인 경우는 0.1인 경우보다 SHB 효과가 작아 같은 단면 반사율에서 수율이 80% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 증가함을 볼 수 있었다.

모드 비팅에 의한 SP 주파수가 THz 대역인 다중 영역 CC DFB 레이저가 높은 수율을 가지고 안정된 동작 특성을 가지기 위해서는 결합세기가 3보다 커야한다고 생각된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-311-D00712), 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(R01-2006-000-11342-0)과 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] Daryoosh Saeedkia, Amir Hamed Majedi, Safieddin Safavi-Naeini, and Raafat R. Mansour, "Analysis and Design of a Photoconductive Integrated Photomixer/Antenna for Terahertz Applications," *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol. 41, no. 2, pp. 234-241, 2005.

[2] 김부균, 김태영, 김상택, 김선호, 박경현, "매우 넓은 영역의 Self-Pulsation 주파수와 높은 변조지수를 가지는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저", *한국광학회지*, vol. 17, no. 2, pp. 191-197, 2006.

[3] 김태영, 김부균, "이득 분산이 다중 영역 복소 결합

DFB 레이저의 Self-Pulsation 특성에 미치는 효과", *한국광학회지*, vol. 18, no. 1, pp. 56-65, 2007.

[4] 김태영, 유종인, 김부균, "양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 Index-Coupled DFB 레이저의 수율 특성에 미치는 영향", *한국광학회지*, vol. 17, no. 6, pp. 548-555, 2006.

[5] M. Möhrle, B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, O. Brox, A. Sigmund, R. Steingrüber, M. Radziunas, and H.-J. Wünsche, "Detuned grating multisection-RW-DFB lasers for high-speed optical signal processing," *IEEE J. Select. Topics on Quantum Electron.*, vol. 7, no. 2, pp. 217-223, 2001.

[6] J. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, "Distributed feedback semiconductor lasers," *London: SPIE Optical Engineering Press*, 1998.

[7] B.-S. Kim, Y. Chung, and J.-S. Lee, "An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 7, pp. 787-794, 2000.

Effect of the Reflectivity of Both Facets and the Phase of a Phase Tuning Section on the Yield Characteristics of a Multisection Complex-Coupled DFB Laser with Self-Pulsation Frequency of THz Region

Tae-Young Kim, Jae-Woo Park, and Boo-Gyoun Kim[†]

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received April 2, 2008; Revised manuscript June 10, 2008; Accepted June 10, 2008)

We investigate the effect in terms of yield of the reflectivity of both facets and of the phase of a phase tuning section on the self-pulsation (SP) characteristics of multisection complex-coupled (CC) DFB lasers with self-pulsation frequency of the THz region. When the grating phases on both facets of a multisection CC DFB laser are fixed as 0, the variation of SP frequency increases as the reflectivity of both facets increases, while that of SP frequency decreases as the coupling ratio (CR) and the coupling strength increase. For the coupling strength of 3, the range of the phase of a phase tuning section with yields greater than 80% decreases as the CR and the reflectivity of both facets increases. For the coupling strength of 4, the range of the phase of a phase tuning section with yields greater than 80% increases as the CR and the reflectivity of both facets increases.

OCIS codes: (140.2020) Diode lasers; (140.3490) Lasers, Distributed-feedback, (140.5960) Semiconductor lasers.